

光透過タイプ半導体空間光変調パネルの実用化

著者	桑村 有司
著者別表示	Kuwamura Yuji
雑誌名	平成19(2007)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	2006-2007
ページ	9p.
発行年	2008-05
URL	http://doi.org/10.24517/00053969



光透過タイプ半導体空間光変調パネルの実用化

18560033

平成18年度～平成19年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)) 研究成果報告書

平成20年5月

研究代表者 桑村 有司

金沢大学附属図書館



1300-05187-6

自然科学研究科 講師

は し が き

3次元空間に広がりを持つ光は並列演算に適した物理媒体であり、並列光コンピュータの構想が推し進められている。光コンピュータは縦続的に接続したパネル型光デバイスを用いて2次元光信号を演算処理して工学的に有意義な2次元光信号を作り出すシステムである。図1に並列光コンピュータシステムにおける情報処理の概念図を示した。光源アレーと光検出アレーの間に数枚の空間光変調パネルを挿入して、変調パネルにデータを入力し、光源アレーで演算則を定め、光検出アレーで演算結果を得るといような構想である。演算を行う中心デバイスは、電圧または光駆動方式による光透過タイプの空間光変調パネルである。既に半導体を用いた光源アレー（面型半導体レーザ等）や光検出アレーは開発されているが、動作速度の速い透過型の空間光変調パネルは存在しない。動作速度の遅い（最速1MHzまで）液晶や電子管を利用した空間光変調器が存在するだけである。半導体を用いた光変調パネルでは動作速度が1GHz程度まで早くできる特徴がある。本研究は当該研究グループが独自に提案し、開発を進めてきた半導体の面型光変調器を光コンピュータ用として利用するために行なった開発研究である。

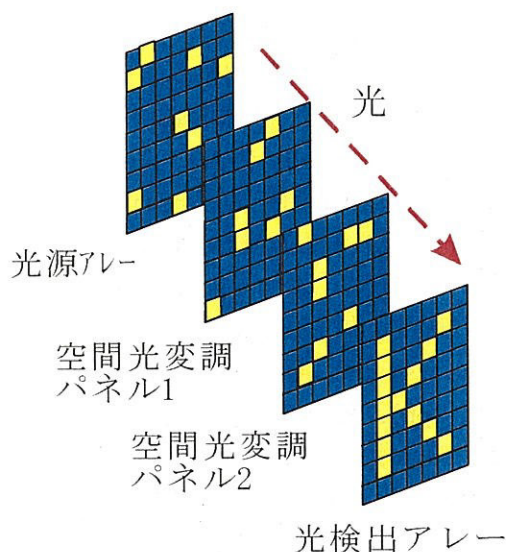


図1. 並列光コンピュータの構想

研究組織

研究代表者：桑村 有司（金沢大学自然科学研究科講師）

研究分担者：山田 実（金沢大学自然科学研究科教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	直接経費	合 計
平成18年度	1,700,000	0	1,700,000
平成19年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総 計	3,300,000	480,000	3,780,000

金沢大学附属図書館



1300-05187-6

研 究 発 表

ア) 雑誌論文

- (1) K. Matsuoka, K. Saeki, E. Teraoka, M. Yamada and Y. Kuwamura,
“Characteristics of intensity noise in blue-violet InGaN Semiconductor lasers”
Proceedings of SPIE, 有, 61330P, 2006, pp.1-9.
- (2) M. Yamada, K. Saeki, E. Teraoka and Y. Kuwamura,
“Reduction of the Intensity Noise by Electric Positive and Negative Feedback in
Blue-Violet InGaN Semiconductor Lasers”
IEICE Trans. Electron., 有, E-89C, 2006, pp858-860.
- (3) M. Ahmed, M. Yamada and S. W. Z. Mahmoud,
“Analysis of semiconductor laser dynamics under gigabit rate modulation” ,
J. Appl. Phys. Vol.95, 有, 101, 2007, pp.1-9.
- (4) M. Ahmed, S. W. Z. Mahmoud and M. Yamada
“Numerical analysis of optical feedback phenomenon and intensity noise of
fiber-grating semiconductor lasers”
Int. J. Numer. Model., 有, 20, 2007, pp.117-132.
- (5) M. Ahmed and M. Yamada
“Influence of External-cavity Length on the Route-to-chaos of Semiconductor
Lasers under Optical Feedback” ,
PRERS ONLINE, 有, 4, 2008, pp.46-50.
- (6) M. Ahmed and M. Yamada
“Noise Associated with Microwave Intensity Modulation of Semiconductor Lasers”,
PRERS ONLINE, 有, 4, 2008, pp.106-110.

イ) 学会発表

- (1) Y. Kuwamura, M. Yamada, R. Okamoto, T. Kanai and H. Fares,
“Observation of optical emission from high refractive index waveguide excited by
Traveling electron beam” , International conference CLEO/QELS2008, 5 May 2008,
San Jose USA.
- (2) 寺岡栄治、佐伯和司、山田実、桑村有司、「InGaN系青紫色半導体レーザにおける電氣的正負帰還による雑音低減化」、電子通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会 LQE2006-18、
2006年6月2日、福井大学
- (3) マルヤム フダ、寺岡栄治、山田実、桑村有司、「半導体レーザにおける電氣的電氣的正負帰還による雑音低減の広帯域化」、電子通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会 LQE2007-1、
2007年5月25日、金沢大学
- (4) 金井猛志、ヒシャム ファリス、桑村有司、山田実、「進行する電子による導波路からの放射」、
電子通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2008年5月23日、福井大学
- (5) H. Fares, M. Yamada, Y. Kuwamura and M. Asada, “Two Models for Electro-Magnetic Wave
Amplifier by Utilizing Traveling Electron Beam” ,
電子通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2008年5月23日、福井大学
- (6) 寺岡栄治、マルヤム フダ、桑村有司、山田実、「InGaN系青紫色半導体レーザにおける電氣的正負帰還による雑音低減化の特性改善」、2006 ソサイエティ大会(電子情報通信学会)、
2006年9月22日、金沢大学
- (7) 寺岡栄治、佐伯和司、桑村有司、山田実、「InGaN系青紫色半導体レーザにおける電氣的正負帰還による雑音低減化特性」、第53回応用物理学会関係連合講演会、2006年4月27日、
武蔵工業大学

- (8) マルヤム フダ、寺岡栄治、桑村有司、山田実、「半導体レーザにおける電氣的正負帰還による雑音低減の広帯域化」、第 54 回応用物理学会関係連合講演会、2007 年 3 月 27 日、青山学院大学
- (9) 岡本龍一、ヒシャム ファリス、金井猛志、桑村有司、山田実、「電子ビームによる高屈折率導波路からの放射光の観測」、第 68 回応用物理学会学術講演会、2007 年 9 月 7 日、北海道工業大学
- (10) 桑村有司、山田実、岡本龍一、金井猛志、ヒシャム ファリス、「進行する電子による導波路からの光放射」、第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月 27 日、日本大学理工学部船橋キャンパス
- (11) ヒシャム ファリス、山田実、桑村有司、浅田雅洋、「進行電子波を用いた電磁波増幅作用での 2 つの解析モデル」、第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008 年 3 月 27 日、日本大学理工学部船橋キャンパス
- (12) 渡邊亮、中谷光仁、桑村有司、山田実、「平面型半導体光変調器の動作特性改良」、平成 19 年度応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会、2007 年 12 月 1 日、富山大学
- (13) 飯野浩光、岡本龍一、桑村有司、山田実、「一方向性光増幅器に用いる Si 細線導波路の試作」、平成 18 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2006 年 9 月 17 日、金沢工業大学
- (14) 宮永直季、渡邊亮、桑村有司、山田実、「平面型半導体光変調器の動作特性改善」、平成 18 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2006 年 9 月 17 日、金沢工業大学
- (15) 池田一樹、石川哲也、山田実、桑村有司、「電子ビームを用いたミリ波増幅現象の観測」、平成 18 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2006 年 9 月 17 日、金沢工業大学
- (16) 金井猛志、岡本龍一、ヒシャム ファリス、桑村有司、山田実、「電子ビームによる高屈折率導波路からの放射光の観測」、平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2007 年 9 月 9 日、福井工業大学
- (17) 石川哲也、森永克久、山田実、桑村有司、「電子ビームを用いたミリ波増幅現象の観測」、平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会、2007 年 9 月 9 日、福井工業大学

研究成果

1. 光変調素子構造と動作原理

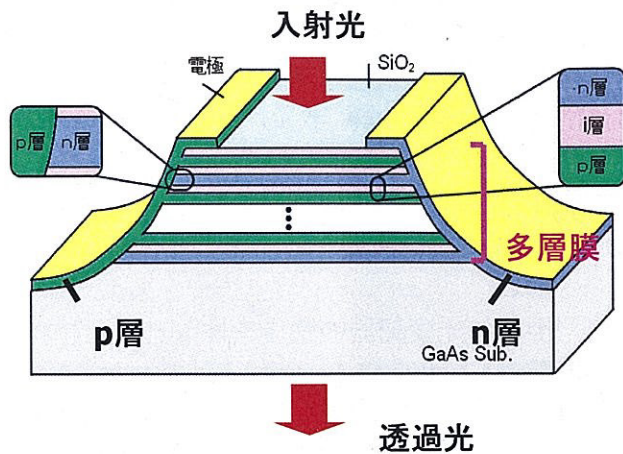


図 2. 面型光変調素子構造

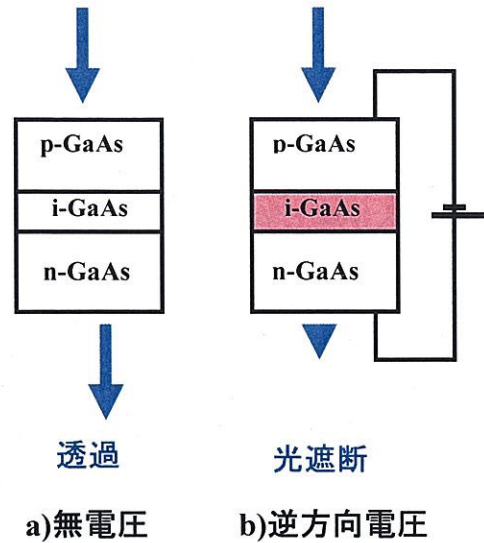


図 3. 動作

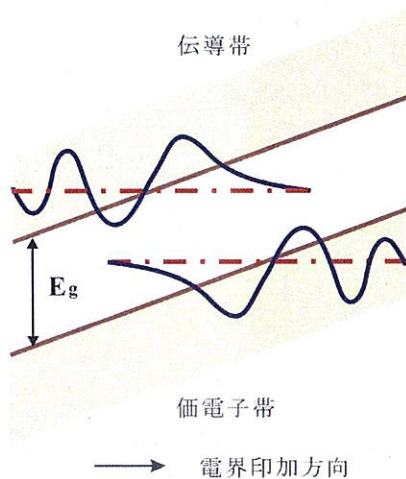


図 4. 電界印加時のバンド構造

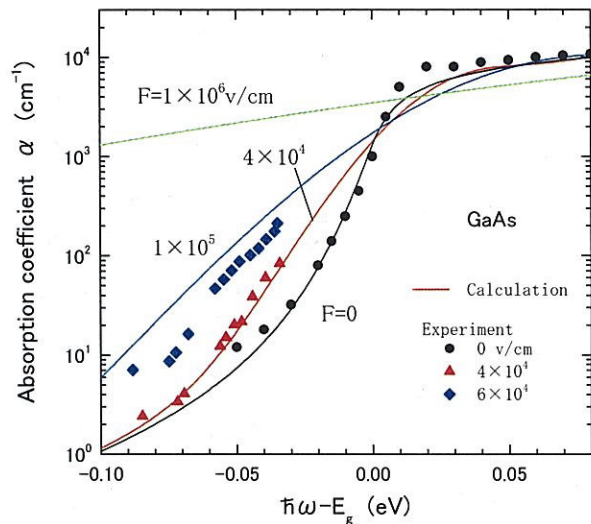


図 5. 電界印加による吸収係数変化

当該研究グループで独自に提案し開発を進めている平面型光変調素子の断面構造を図2に示す。この変調素子は、直接遷移型半導体中に電界を加えると光吸収が増加する現象を利用したもので、図2中央の p-GaAs / i-GaAs / n-GaAs…多層膜中の i-GaAs 層の内部電界を外部電圧により可変制御して透過光を強度変調するものである。光は上側から入力し、下側へ透過させる平面型でかつ透過タイプであり、面内に多数集積することで空間光変調器を構成できる。電圧は左右に設けた p-GaAs と n-GaAs 層上部の電極間に印加して、多層膜中の p-GaAs および n-GaAs 導電層を通じて多数の i-GaAs 層内に電界を加える構造としている。この構造が我々の変調器の大きな特徴であり、低い電圧変化で高い消光比が実現できる。図3に示すように p 側及び n 側電極に対して無バイアスの時には「光透過」、逆方向電圧を加えると「光遮断」となる。1 対の pin では、消光が小さいので図2のように pin 構造を数十対積み重ねている。

動作原理であるバルク半導体での電界効果はフランツ・ケルディッシュ効果とも呼ばれ、次のように理解されている。一般に半導体にはバンドギャップエネルギー E_g を有し、 E_g よりも小さな

エネルギーの光は吸収されず、透過する。しかし、半導体に電界を加えると、図4のようにバンド端が傾斜するので伝導帯の電子と価電子帯の正孔はバンドギャップ内に染み出して分布することになる。本来のバンドギャップエネルギーを E_g とすると、染み出した電子と正孔とのエネルギー差 E_g' は $E_g' < E_g$ となる。つまり、電界を印加するとバンドギャップよりも小さなエネルギーの光でも吸収されるようになる。図5には電界印加に伴う GaAs 結晶の吸収係数変化の理論計算と実験値とを示した。 10^5V/cm の電界印加では E_g より僅かに低い光子エネルギー帯において吸収係数が 1000cm^{-1} 程度増加する。電界の有無による光吸収の差を利用して「光透過」と「光遮断」を制御する。図2の構造において5V程度の電圧変化で10dBの消光比を実現するには、 $1 \mu\text{m}$ 厚の i-GaAs を25層程度積層する必要がある。

2. 電圧駆動方式の面型光変調器の改良と高性能化

変調器の高性能化では、高速化、消費電力の低減、挿入損の低減を目的として以下の改良を行った。動作速度 f_r は変調画素の静電容量 C と回路の抵抗 R の CR 時定数 ($f_r = 1/\pi CR$) で決定される。そこで素子の小型化により静電容量を小さくして高速化をはかった。図6は素子サイズ S と予想される動作速度の見積もりで、数GHzまでの高速化が実現可能である。

一方、従来素子の1画素当りの消費電力は約1~2mWと大きく、集積化の問題となっていた。この原因は、逆バイアス印加時に多層膜と左右のpおよびn型電極層界面にあるpn接合面で、漏れ電流が多く流れてしまうという問題があった。そこで、左右のp及びn型電極層の濃度を従来素子の濃度より1ケタ低く (10^{18}cm^{-3} から 10^{17}cm^{-3}) することで、逆方向耐電圧を高くして漏れ電流を抑える改良を試みた。

また、従来素子の挿入損は、12dB程度と大きいことが問題であった。挿入損 δ は、「 $\delta = \text{出力光強度} / \text{入力光強度}$ 」で定義される。挿入損が12dBということは、入力光に対して6%程度の光しか透過せず94%の光は損失になっていた。図7に示すように挿入損が生じる原因には、素子内部を光が通過する際に光吸収される吸収損と屈折率の異なる光の入出射端面での反射損があり、従来素子では吸収損が9dB、反射損が3dB程度あった。吸収損を低減する方法として、光変調動作に寄与しないGaAs基板とp型n型GaAs層を、従来のGaAsからバンドギャップの大きなAlGaAsに変更することで吸収損の低減し、反射損については光入出射端面に無反射コーティングを施す方法で挿入損の低減を試みた。

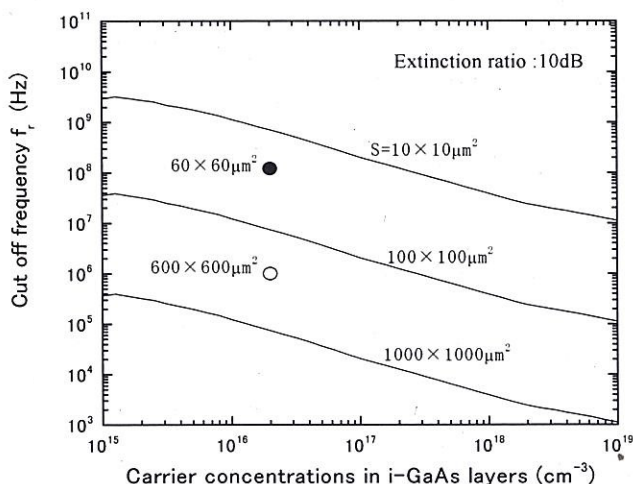


図6 変調素子の動作速度

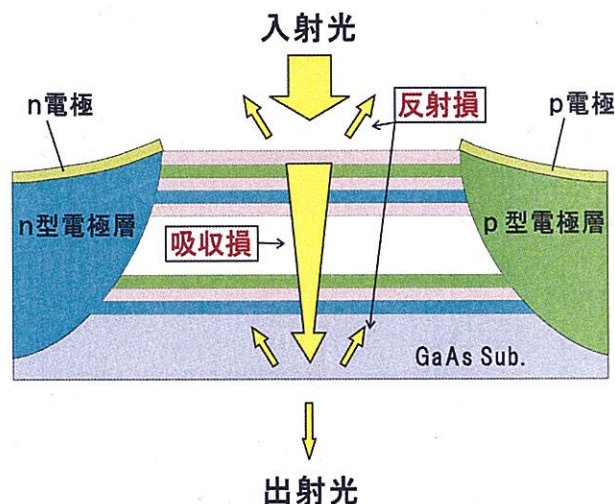


図7 挿入損の原因 (吸収損、反射損)

素子試作には3回の液相結晶成長法を利用した。まず、絶縁性 AlGaAs 基板上に n-AlGaAs ($1\mu\text{m}:1\times10^{18}\text{cm}^{-3}$)、i-GaAs ($1\mu\text{m}:2\times10^{16}\text{cm}^{-3}$)、p-AlGaAs ($2\mu\text{m}:2\times10^{18}\text{cm}^{-3}$)の各層を図2に示すように順次積み重ね、20層の i-GaAs 層を有する多層膜を成長した。その後、化学エッチングにより多層膜の左右を溝形状に取り除いてストライプ形状のメサを形成した。2回目と3回目の結晶成長では、 SiO_2 膜を用いた選択成長により多層膜の左右の溝部に n-GaAs と p-GaAs をそれぞれ埋め込み成長した。素子サイズとしては約 $60\times60\mu\text{m}^2$ 程度までの小型化を行なった。図8および図9には、それぞれ作製した素子の断面写真、消光特性を示した。液相成長の方法改良や成長時間の条件を再調整した結果、図8に示すような多層膜厚の均一成長が実現できた。波長 890nm の光入射に対する消光比は図9中の赤丸で示すように 10V の電圧変化で約 8dB の消光であった。

図10と図11には、それぞれ変調素子の変調周波数特性、消費電力と消光比の関係を示した。素子寸法を $60\times60\mu\text{m}^2$ まで小型化したため、動作速度は 120MHz まで向上した。また、改良した素子の消費電力は図11中で赤丸印で示してある（黒丸：従来素子）が、消費電力は 0.1mW となり（消光率 55% の条件；従来素子電力 1.5mW）、従来素子の 1/10 以下まで消費電力を低減できた。

図12には挿入損と光入射波長の特性を示した。AlGaAs 基板と AlGaAs 多層膜で作製した素子の挿入損（消光比の大きな 890nm の波長 λ ）は 5.3dB となり、従来素子の 12dB から損失を約 6.7dB 低減することができた。なお、今回試作した素子では無反射コート膜厚が $\lambda/4$ 厚になっていなかったため、膜厚調整により挿入損は 4dB 程度まで下げられると予想される。

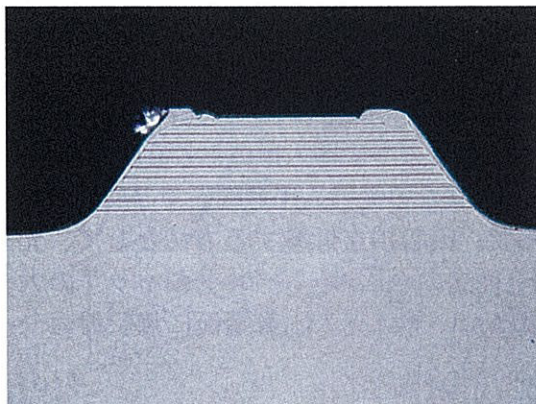


図8. 試作した素子の断面写真

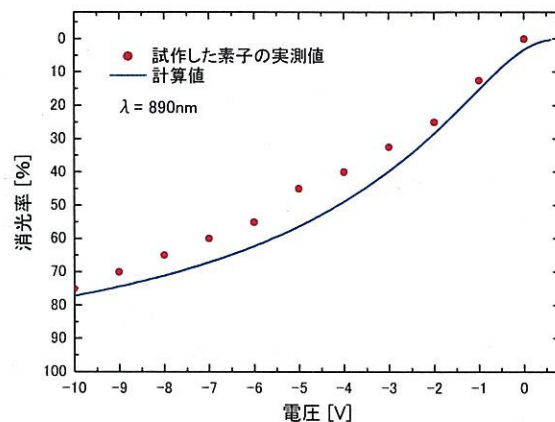


図9. 消光特性

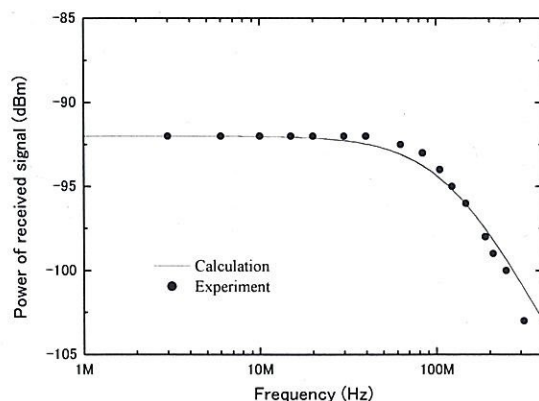


図10. 動作速度

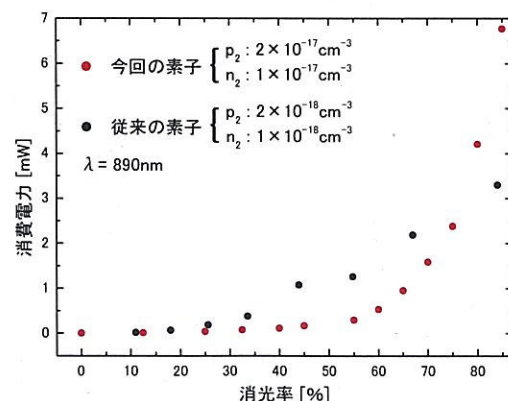


図11. 消費電力と消光比の関係

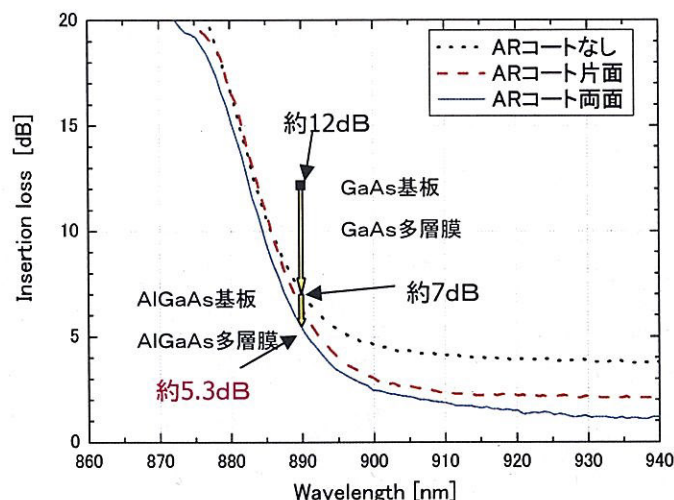


図 12 挿入損の波長特性

3. 光駆動方式の空間光変調素子の開発

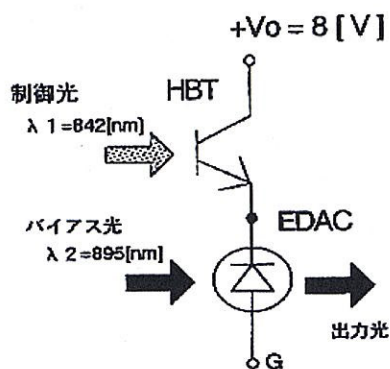


図 13. 光駆動方式の空間光変調素子の等価回路

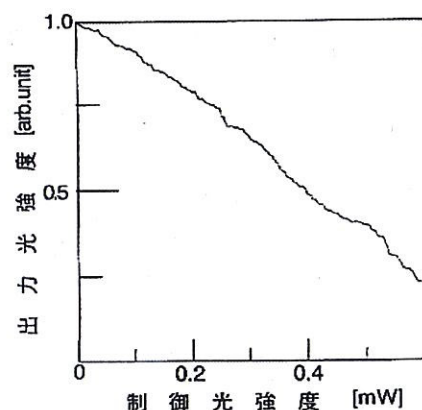


図 14. 光-光制御特性

光駆動方式の空間光変調素子については、ヘテロバイポーラフォトトランジスタ (HBT) と電圧駆動方式の光変調素子 (EDAC) とを直列接続した図 13 の等価回路で示される構成で、光-光制御特性を調べた。HBT 光検出器に入力した波長 842nm の光強度 (制御光強度) で、EDAC から出力した波長 895nm のバイアス光強度 (出力光強度) を制御した。図 14 に光-光制御実験の結果を示した。0.6mW の制御光で、バイアス光の出力光強度が 1/4 まで低減でき、光反転演算ができることを実験で実証した。その他、多様な光演算操作については今後の課題となった。

4. 光変調パネルの試作

多層膜中に p 及び n-AlGaAs 導電層を成長したウエハでは Al 酸化の問題により良好な特性が得られる素子の歩留まりが悪かった。そこで、光変調パネルの試作は図 2 の GaAs 多層膜で光変調パネルの試作を行った。i-GaAs 層を 19 層積み重ねた光変調素子を縦 10×横 10 個、二次元的に配列して光変調パネルを作製した。試作した光変調パネルの表面写真を図 15 に示す。光入射用窓の大きさは約 1×0.7mm²、アレー変調器全体の大きさは約 8×10mm² である。各画素へは金線ワイヤを用いて電気配線を施した。

各画素の消光特性は図 9 とほぼ同様であり、消光率は 6.5V の電圧変化で 70% 以上であった。

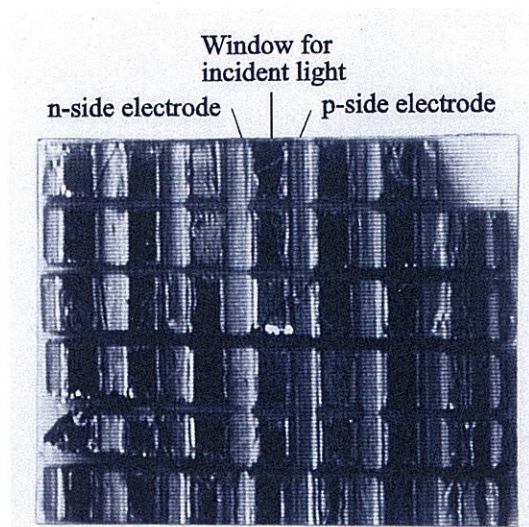


図 15 光変調パネルの表面写真

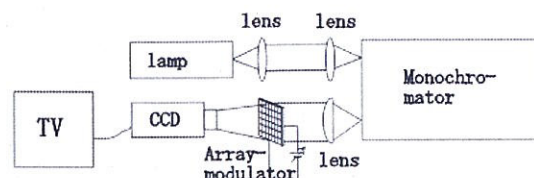
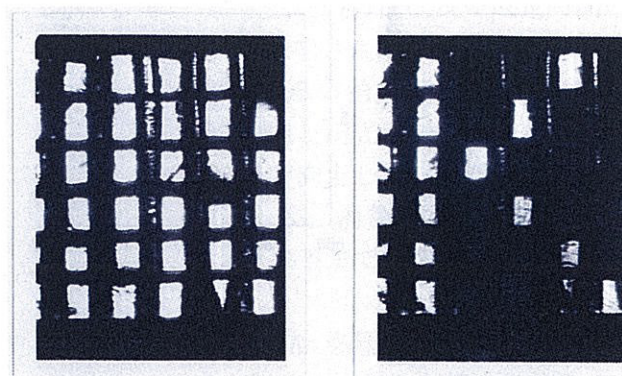


図 16 光学系



(a) No bias (b) -7V voltage

図 17. 光変調パネルからの出力された光映像

試作した 36 画素のうち 32 画素において図 9 と同様の消光が確認された。波長 895nm での挿入損は約 7dB であった。

試作した光変調パネルを利用して文字画像の出力を試みた。文字画像の出力に用いた光学系を図 16 に示す。光源からの光を分光器で波長選択し 890nm 近傍の光を取り出し平行ビームとして変調器の基板側から入射した。そして変調器からの透過光を CCD カメラで検出してテレビ画像として観測した。図 17(a) (b) には観測したテレビ画像を示す。(a) はすべての画素に電圧を印加していない場合の画像で、「光透過」となるため全ての画素が白く見えている。(b) はいくつかの画素に -7V の電圧を加えた場合である。電圧を加えた画素が「光遮断」となるため黒くなり、「K」という文字が描き出されているのが確認できた。

1000×1000 程度に大規模集積化した光空間変調パネルの実現までは達成できなかったが、大規模集積化 (1000×1000) における各種プロセス技術の開発を行った。微細加工技術及びプロセス技術の改善や電気配線法などの実験的検討を行い、大規模集積化に向けての基盤技術が確立できた。

5. まとめ

当該グループで提案し開発を行ってきた面型光変調器を光コンピュータ用として利用するための電気駆動方式の光変調素子の高性能化・高機能化と光駆動方式の変調素子に関する研究を行った。電気駆動方式の素子としては変調画素の高速化、消費電力及び挿入損の低減を目的とした。速度は 120MHz (従来 1.2MHz) までの高速で、消費電力は 0.1mW (従来 1~2mW)、挿入損は 5.3 dB まで低減することができた。また、光駆動方式としては、ヘテロバイポーラフォトトランジスタと上記変調素子を利用して光反転演算ができることを実証した。

一方、試作した光変調パネルにおいては、変調器から出力された光映像が文字画像として認識できることを確認した。

1000×1000 程度に大規模集積化した空間変調パネルの実現までは達成できなかったが、低電力化への問題解決策や微細加工技術及びプロセス技術の改善や電気配線法などの実験的検討を行い、大規模集積化に向けての基盤技術が確立できた。